

学校编码: 10384
学 号: 19320051301942

分类号 _____ 密级 _____
UDC _____

厦 门 大 学

硕 士 学 位 论 文

富含 Bi_2O_3 微晶封接玻璃的制备及表征

Preparation and Characterization of Sealing Glass Ceramics

Rich in Bi_2O_3

张计华

指导教师姓名: 曾 人 杰 教授

专 业 名 称: 材料物理与化学

论文提交日期: 2008 年 7 月

论文答辩时间: 2008 年 7 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: _____

评 阅 人: _____

2008 年 07 月

厦门大学学位论文原创性声明

本人呈交的学位论文是本人在导师指导下,独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考其他个人或集体已经发表的研究成果,均在文中以适当方式明确标明,并符合法律规范和《厦门大学研究生学术活动规范(试行)》。

另外,该学位论文为()课题(组)的研究成果,获得()课题(组)经费或实验室的资助,在()实验室完成。(请在以上括号内填写课题或课题组负责人或实验室名称,未有此项声明内容的,可以不作特别声明。)

声明人(签名):

年 月 日

厦门大学学位论文著作权使用声明

本人同意厦门大学根据《中华人民共和国学位条例暂行实施办法》等规定保留和使用此学位论文，并向主管部门或其指定机构送交学位论文（包括纸质版和电子版），允许学位论文进入厦门大学图书馆及其数据库被查阅、借阅。本人同意厦门大学将学位论文加入全国博士、硕士学位论文共建单位数据库进行检索，将学位论文的标题和摘要汇编出版，采用影印、缩印或者其它方式合理复制学位论文。

本学位论文属于：

（ ） 1. 经厦门大学保密委员会审查核定的保密学位论文，
于 年 月 日解密，解密后适用上述授权。

（ ） 2. 不保密，适用上述授权。

（请在以上相应括号内打“√”或填上相应内容。保密学位论文应是已经厦门大学保密委员会审定过的学位论文，未经厦门大学保密委员会审定的学位论文均为公开学位论文。此声明栏不填写的，默认为公开学位论文，均适用上述授权。）

声明人（签名）：

年 月 日

目录

| | |
|---------------------------|-----------|
| 中文摘要 | I |
| Abstract | II |
| 第一章 绪论 | 1 |
| 1.1 微晶玻璃的概述 | 2 |
| 1.1.1 微晶玻璃的发展和特点 | 2 |
| 1.1.2 微晶玻璃的制备工艺 | 3 |
| 1.1.3 微晶玻璃的主要应用系统 | 5 |
| 1.2 封接玻璃的分类和应用 | 7 |
| 1.2.1 封接玻璃的分类 | 7 |
| 1.2.2 封接玻璃的应用 | 8 |
| 1.3 玻璃—金属封接概况 | 9 |
| 1.3.1 玻璃—金属封接的条件 | 9 |
| 1.3.2 对金属的要求 | 10 |
| 1.3.3 对封接玻璃的性能要求 | 12 |
| 1.3.4 玻璃—金属封接的工艺 | 13 |
| 1.4 封接玻璃的研究现状 | 16 |
| 1.5 本课题的提出 | 16 |
| [参考文献] | 20 |
| 第二章 实验原料与仪器及表征测试方法 | 22 |
| 2.1 设备与原料 | 22 |
| 2.1.1 实验仪器设备 | 22 |
| 2.1.2 实验原料 | 23 |
| 2.2 微晶封接玻璃的制备工艺 | 24 |
| 2.2.1 制备工艺流程 | 24 |
| 2.2.2 制备用设备和工艺参数 | 25 |
| 2.2.2.1 玻璃的熔化和澄清 | 25 |
| 2.2.2.2 球磨粉碎 | 26 |
| 2.2.2.3 造粒 | 26 |
| 2.2.2.4 压制成型 | 27 |
| 2.3 表征方法 | 28 |
| 2.3.1 热重-差热分析 | 28 |
| 2.3.2 粉体的晶相分析 | 28 |
| 2.3.3 粉体形貌分析 | 29 |
| 2.3.4 光学显微镜分析 | 29 |
| 2.3.5 试样膨胀系数分析 | 30 |
| 2.3.6 试样电绝缘性分析 | 31 |
| 2.3.7 试样耐水性分析 | 32 |
| 2.3.8 试样流散性分析 | 32 |

| | |
|--------|----|
| [参考文献] | 33 |
|--------|----|

| | |
|--------------------------|-----------|
| 第三章 封接玻璃粉体制备及性能表征 | 34 |
|--------------------------|-----------|

| | |
|--------------------------|----|
| 3.1 封接玻璃粉体的制备 | 35 |
| 3.1.1 封接玻璃的配方设计 | 35 |
| 3.1.2 各氧化物对玻璃性能的影响 | 36 |
| 3.1.3 玻璃的熔化 | 37 |
| 3.1.4 B_2O_3 的挥发量 | 39 |
| 3.2 球磨对玻璃粉体的影响 | 40 |
| 3.2.1 玛瑙球及锆球球磨对玻璃粉体性能的影响 | 40 |
| 3.2.2 球磨时间对玻璃粉体性能的影响 | 42 |
| 3.3 玻璃液对坩埚的腐蚀讨论 | 45 |
| 3.4 本章小结 | 47 |
| [参考文献] | 48 |

| | |
|---------------------------|-----------|
| 第四章 微晶玻璃的制备工艺及性能研究 | 49 |
|---------------------------|-----------|

| | |
|----------------------|----|
| 4.1 玻璃粉的造粒成型 | 49 |
| 4.1.1 粘结剂的选择 | 49 |
| 4.1.2 两种造粒方法对团粒性能的影响 | 50 |
| 4.2 粘结剂的挥发 | 52 |
| 4.3 烧结和微晶化温度的控制 | 54 |
| 4.4 微晶玻璃的性能分析 | 56 |
| 4.4.1 玻璃的微晶化情况分析 | 56 |
| 4.4.2 微晶玻璃的膨胀系数和软化温度 | 59 |
| 4.4.3 微晶玻璃的电绝缘性能分析 | 60 |
| 4.4.4 微晶玻璃的耐水性能分析 | 61 |
| 4.4.5 封接微晶玻璃流散性的测定 | 62 |
| 4.5 小结 | 63 |
| [参考文献] | 65 |

| | |
|---------------|-----------|
| 第五章 结论 | 66 |
|---------------|-----------|

| | |
|-----------------------|-----------|
| 作者硕士期间发表的论文和成果 | 68 |
|-----------------------|-----------|

| | |
|------------|-----------|
| 致 谢 | 69 |
|------------|-----------|

Contents

| | |
|----------------------------------|----------|
| Abstract in Chinese | I |
|----------------------------------|----------|

| | |
|----------------------------------|-----------|
| Abstract in English | II |
|----------------------------------|-----------|

Chapter I Introduction

| | |
|--|--------------|
| 1.1 Introduction to glass ceramics..... | |
| 1.1.2 Preparation of glass ceramics..... | 3 |
| 1.1.3 Main application system of glass ceramics..... | 5 |
| 1.2 Sort and application of the sealing glass | 2 |
| 1.1.1 Progress and characteristic of glass ceramics..... | 27 |
| 1.2.1 Sort of sealing glass..... | 7 |
| 1.2.2 Application of sealing glass | 8 |
| 1.3 Survey of sealing between glass and metal | 9 |
| 1.3.1 Condition of sealing between glass and metal..... | 9 |
| 1.3.2 Demand to metal | 10 |
| 1.3.3 Demand to the property of sealing glass..... | 12 |
| 1.3.4 Technics of sealing between glass and metal..... | 13 |
| 1.4 Actuality research of sealing glass | 16 |
| 1.5 Objective and meaning of the dissertation..... | 16 |
| References | 20 |

Chapter II Raw Materials and Characterization Methods

| | |
|---|-----------|
| 2.1 Raw materials and instruments | 22 |
| 2.1.1 Instruments used in the experiments..... | 22 |
| 2.1.2 Raw materials used in the experiment..... | 23 |
| 2.2 Processing of sealing glass ceramics | 24 |
| 2.2.1 Processing flow..... | 24 |

| | |
|---|-----------|
| 2.2.2 equipment and parameter of preparation..... | 25 |
| 2.3 Characterization | 28 |
| 2.3.1 TG-DTA analysis | 28 |
| 2.3.2 XRD analysis..... | 28 |
| 2.3.3 SEM analysis of the powder..... | 29 |
| 2.3.4 Optical microscope analysis..... | 29 |
| 2.3.5 Dilatometry analysis..... | 30 |
| 2.3.6 Insulation analysis..... | 31 |
| 2.3.7 Water durabilit analysis..... | 32 |
| 2.3.8 Fluxion property analysis..... | 32 |
| References | 33 |

Chapter III Preparation and Characterizaion of the Sealing Glass

Powder

| | |
|--|-----------|
| 3.1 Preparation of the sealing glass powder | 35 |
| 3.1.1 Composition design of the sealing glass..... | 35 |
| 3.1.2 Effects of the various oxides on the glass properties | 36 |
| 3.1.3 melting and Defecating of the glass..... | 37 |
| 3.1.4 Volatilization of B ₂ O ₃ | 39 |
| 3.2 Effects of ball milling on the glass powder..... | 40 |
| 3.2.1 Effects of agate and zirconium ball on milling the glass powder..... | 40 |
| 3.2.2 Effects of the milling time on the glass powder..... | 42 |
| 3.3 Discussion of the crucible' erodibility..... | 45 |
| 3.4 Summary..... | 47 |
| Reference..... | 48 |

Chapter IV Studies of Preparation Technics and Properties of the

Glass Ceramics

| | |
|--|----|
| 4.1 Granulation and molding of glass powder | 49 |
| 4.1.1 Choice of the binder..... | 49 |
| 4.1.2 Effects of two kinds of granulation methods on aggregation properties... | 50 |
| 4.2 Volatilization of the binder | 52 |
| 4.3 Control of the sintering and crystallization temperature | 54 |
| 4.4 Characterization of the glass ceramics | 56 |
| 4.4.1 XRD analysis..... | 56 |
| 4.4.2 Dilatometry and softening temperature measurement..... | 59 |
| 4.4.3 Insulation property analysis of the glass ceramics..... | 60 |
| 4.4.4 Water durability analysis of the glass ceramics..... | 61 |
| 4.4.5 Fluxion property of the glass ceramics..... | 62 |
| 4.5 Summary | 63 |
| Reference | 65 |

| | |
|------------------------------------|----|
| Chapter V Conclusions | 66 |
|------------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| Published papers | 68 |
|-------------------------------|----|

| | |
|-------------------------------|----|
| Acknowledgements | 69 |
|-------------------------------|----|

中文摘要

目前,国内外电子与电器设备上的电热管常用的封接材料是含铅微晶玻璃。欧盟自 2006 年 7 月 1 日起启动“RoHS”指令,中国于 2007 年 3 月 1 日起开始实施《电子信息产品污染控制管理办法》,都对电子与电器设备中的封接材料含铅量作了严格的限制。因此,研制无铅微晶封接玻璃具有十分重大的意义。

本文概述了封接玻璃和玻璃—金属封接的研究现状和应用需求。在深入课题调研基础上,优化配方设计,采用高温熔融法熔化玻璃,制得玻璃粉;测定了玻璃化转变温度(T_g)和软化温度(T_f);通过热处理获得微晶封接玻璃。

研究了磨球种类、研磨时间、坩埚种类等对玻璃粉体性能的影响;通过对玻璃粉人工和喷雾造粒、模压成型、烧结制备了富含 Bi_2O_3 系微晶玻璃。采用 XRD、TG-DTA、SEM、热膨胀测量法和光学显微镜等手段对玻璃粉体,微晶玻璃的性能进行表征。

分别研究了三种不同粘结剂的挥发、造粒方法及微晶化温度的控制。测试了两种微晶玻璃的 T_g , T_f 及膨胀系数(α),结果表明,该系统玻璃 T_f 较低,可在较低温度下实现与金属材料的封接; α 接近其封接的金属,保证了封接后的气密性,在实际上可取代传统含铅微晶封接玻璃。

测试了两种微晶玻璃的电绝缘性、耐水性、流散性,研究了影响因素并提出改进的方案。

关键词: 无铅; 微晶玻璃; 膨胀系数; 软化温度; 玻璃—金属封接

Abstract

In recent years, PbO glass ceramics have been used widely in electron device field as sealing materials, whereas the injunction called “RoHS” has been put in practice from 1st July 2006, and Chinese government also has implemented an injunction, namely “Manage means control of pollution caused by products ” from 1st March 2008, that banning PbO sealing glass ceramics in life electron equipment field, so that the lead-free sealing glass ceramics will play an important role in the future.

Having sufficiently investigated the development and application demanding of the sealing glass and the glass-to-metal sealing, this investigation in the composition was improved. The glass power was prepared by high temperature melting. The transition temperature (T_g) and softening temperature (T_f) of the glass were tested, and the sealing glass ceramics were prepared by heat treatment.

The effect of the balls, ball milling time and crucibles on the properties of the glass power was studied. The sealing glass ceramics rich in Bi_2O_3 was prepared by granulation, molding and heat treatment. The glass ceramics and glass power were characterized by DTA, XRD, dilatometry (DIL) and photo-microscope etc.

In this investigation the volatilization of three kinds of binder were studied respectively. The methods of granulation and control of crystallization temperature were studied. The T_g , T_f and thermal expansion coefficient (α) of the two kinds of glass ceramics were also measured, the results indicate that the T_f of this system glass is low enough to seal the metal under low temperature, and the α matches that of metal. It shows that the sealing glass ceramics rich in Bi_2O_3 meet the demand of environmental protection for lead-free, and it can replace of the traditional PbO system glass.

The dielectric property, water durability and fluxion property of the two kinds of glass ceramics were tested, and the affecting factors were studied and the suggestion was also given.

Key words: lead-free; glass ceramics; thermal expansion coefficient; softening temperature; glass-to-metal sealing

厦门大学博士论文摘要库

第一章 绪论

近 40 年前,人们偶然发现在硅酸锂玻璃中内部的成核与生长后^[1],微晶玻璃以惊人的速度发展起来,并有了广泛的应用。微晶玻璃的结构、性能及生产方法与玻璃和陶瓷都有差别,但又集中了这两者的特点,英文名称为 glass ceramics,直译是玻璃陶瓷,它是将适当组成的玻璃在一定的控制条件下进行加热处理,使很多的细小的(直径小于 $1\ \mu$)微晶均匀析出并成长而制得的象陶瓷那样的多晶体,所以更常称为微晶玻璃。制备微晶玻璃过程中,由于异相成核和表面成核更加容易,所以结晶一般从玻璃表面开始,并向内部生长,通常含有体积分数 50%以上晶相,并且具有晶粒尺寸小于 $1.0\times 10^{-5}\text{m}$ 的细晶^[2]。

随着近代科学技术,特别是微电子技术、电子显示、光电子技术及载人航天工程的迅速发展,器件的小型化、结构元件的精密化程度不断提高,电子元器件的种类越来越多,制品的形状也越来越复杂,它们对封接制品的气密性和可靠性的要求越来越高,对工作环境的要求也越来越高^[3]。

封接材料种类繁多,从化学成分上大致可以分成有机材料、无机材料和金属材料三类。其中,有机材料包括环氧树脂、有机硅橡胶、硅酮树脂等有机高分子材料^[4],主要用于低温封接;无机材料主要包括玻璃、微晶玻璃搪瓷等,主要适用于高温、气密性封接;金属材料主要是 Pb-Sn 焊锡等焊料,主要适用于电子产品中的焊料。玻璃类材料作为封接材料的一种,由于其在气密性和耐热性方面优于有机高分子材料,在电绝缘性能方面又优于金属材料^[5],因而可应用于真空电子技术、激光和红外技术、电光源、高能物理和宇航工业、能源、汽车工业、化学工业、工业测量等领域。由此可以看出,微晶封接玻璃具有广泛的应用领域。我国对微晶封接玻璃的需求量以平均 7.4% 的年增长率不断增长^[6],日本预测在未来几年对封接玻璃的需求以 3.2% 的年增长率增长^[7]。

1.1 微晶玻璃的概述

1.1.1 微晶玻璃的发展和特点

玻璃是一种非晶态固体。从热力学观点看，它是一种亚稳定态，较晶体有较高的内能，因此在一定的条件下可以转化为晶态；从动力学观点看，玻璃熔体在冷却过程中，粘度的快速增加抑制了晶核的形成和长大，使其难以转化为晶态。微晶玻璃就是人们充分利用玻璃在热力学上的有利条件而获得的材料。

微晶玻璃的结构、性能及生产方法与玻璃和陶瓷都有差别，但又集中了这两者的特点。图 1.1 比较了玻璃、陶瓷和微晶玻璃三者在制备过程中的差异。

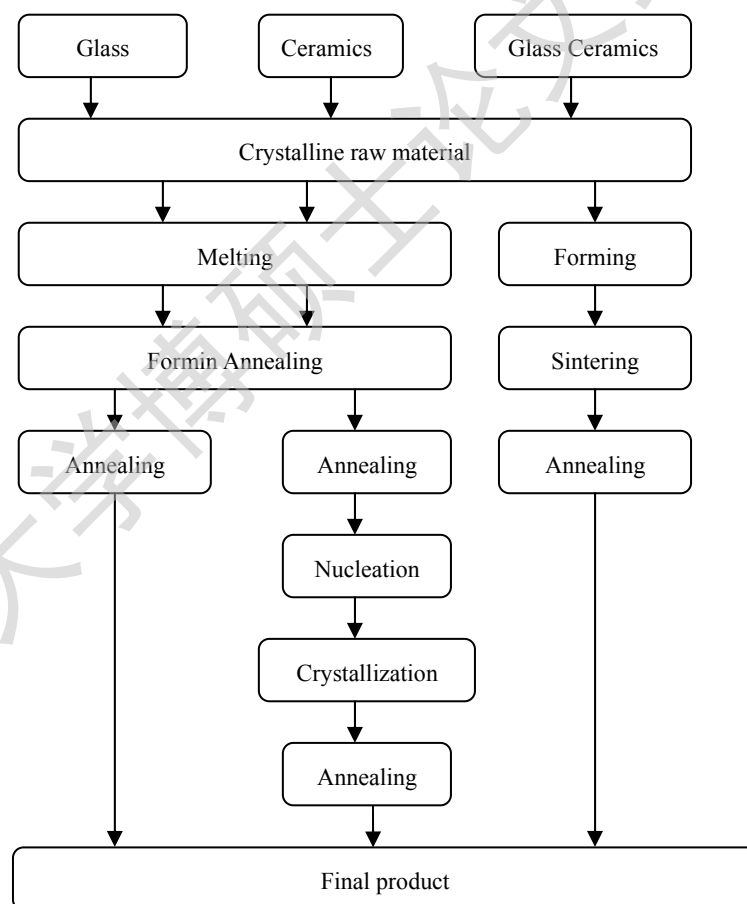


图 1.1 玻璃、陶瓷、和微晶玻璃三者在制备过程中的差异

至今为止，微晶玻璃的发展已经历经了四十多年的历史，它大概可以分成三个阶段：（1）五十年代到七十年代中期，主要是研究低膨胀系数的微晶玻璃，并

获得了透明材料^[8,9], 最为典型的是 $\text{Li}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ 系统微晶玻璃; (2) 七十年代中期到八十年代中期, 开发了具有与金属类似的可加工性和较高强度与韧性的可切削微晶玻璃^[10], 如片状氟金云母型微晶玻璃; (3) 八十年代中期到至今, 更为复杂结构与多相的微晶玻璃得到了广泛的研究, 特别是在生物材料、超导材料、核废物处理等方面, 极大的扩展了微晶玻璃应用领域^[11]。在这一阶段, 特别是在九十年代, 对微晶玻璃制备技术的研究取得了瞩目的成就, 开发了新的工艺, 如溶胶—凝胶法、烧结法 (又称粉末冶金) 等。

微晶玻璃材料与其它无机非金属材料相比, 其物理性能的调控范围更大。其一个重要特点是它的组成可以在很宽范围内变化。此外, 变化热处理条件可使微晶玻璃中晶体的种类、大小以及玻璃相与晶相的比例得到有效的控制, 从而可以在比较大范围内控制微晶玻璃的性能; 这对于许多领域工程发展中给材料所提出的各种特定要求提供了解决的办法。

1.1.2 微晶玻璃的制备工艺

微晶玻璃制备方法根据其所用原材料的种类、特性、对材料的性能要求而变化, 主要有熔融法、烧结法、溶胶—凝胶法、二次成型工艺、强韧化技术等。一、熔融法: 微晶玻璃最早采用的制备方法就是熔制法, 直到今天熔制法仍是制备微晶玻璃的主要方法。熔制法的主要工艺过程为: 将一定量的晶核剂加入到玻璃原料中, 充分混合均匀制成玻璃混合料, 于 $1500\sim 1600^\circ\text{C}$ 高温下熔制, 均化后将玻璃成型, 经退火后在一定温度下进行核化和晶化, 以获得晶粒细小且结构均匀的微晶玻璃制品。

热处理制度的确定是微晶玻璃生产的技术关键。最佳的成核温度一般介于相当于粘度为 $10^{11}\sim 10^{12}\text{Pa}\cdot\text{s}$ 的温度范围之间。作为初步约近似估计, 最佳成核温度介于 T_g 和比它高 50°C 的温度之间。晶化温度上限应低于主晶相在一个适当的时间内重熔的温度。根据热处理过程一般分两个阶段进行, 即将退火后的玻璃加热至晶核形成温度 $T_{\text{核}}$, 并保温一定时间, 在玻璃中出现大量稳定的晶核后再升温到晶体生长温度, 使玻璃转变为具有亚微米甚至纳米尺寸的微晶玻璃。

熔融法制备微晶玻璃具有如下优点: (一) 可采用任何一种玻璃的成形方法如: 压制、浇注、吹制、便于生产形状复杂的制品和机械化生产; (二) 制品无

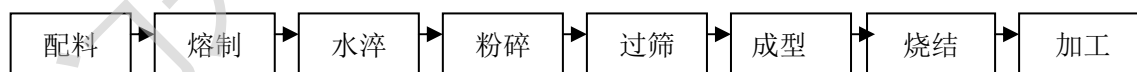
气孔，致密度高；（三）玻璃组成范围宽。其缺点为：（一）熔制温度过高，通常都在 $1400\sim 1600^{\circ}\text{C}$ ，能耗大；（二）热处理制度在现实生产中难于控制操纵；（三）晶化温度高，时间长，现实生产中难于实现。

熔融法可采用技术成熟的玻璃成型工艺来制备形状复杂的制品，便于机械化生产。由玻璃坯体制备的微晶玻璃在尺寸上变化不大，组成均匀，不存在气孔、空隙等陶瓷中常见的缺陷，因而微晶玻璃不仅性能优良且具有比陶瓷更高的可靠性。

二、烧结法：使玻璃粉末产生颗粒粘结，然后经过物质迁移使粉末产生强度并导致致密化和再结晶的过程。烧结的推动力是粉状物料的表面能大于多晶烧结体的晶界能。

烧结微晶玻璃是将玻璃颗粒通过受控烧结、结晶制得。与普通陶瓷烧结不同，烧结微晶玻璃是将玻璃颗粒进行烧结，在加热、烧结过程中，玻璃本身还发生成核析晶现象。析晶有利于提高烧结体的强度和美化外观装饰效果，但同时也增加玻璃的粘度，阻碍粘性流动，甚至使烧结难于进行。因此烧结法生产微晶玻璃要求基础玻璃在较低的粘度下具有一定的析晶能力，并且其表面析晶速度不宜太大。其目的是为了使烧结时的致密化和晶化过程发生在不同的温度区域，以减少析晶对致密化的干扰。在微晶玻璃的烧结和结晶过程中，控制适当的表面析晶速率是获得低气孔率微晶玻璃的关键。

烧结法制备微晶玻璃的工艺流程如下：



它的优点是：（一）基础玻璃的熔制温度与熔融法相比较，熔融温度低且时间短，因此该法适于需要高温才能熔融的玻璃制备微晶玻璃。（二）烧结法还有一个显著的特点，即玻璃经过水淬后，颗粒细小，表面积增加，比熔融法制得的玻璃更易晶化，因而有时可以不使用晶核剂。（三）生产过程易于控制，很容易实现机械化、自动化生产，便于目前建筑陶瓷厂的转型。（四）产品质量好，成品率高，厚度及规格可变，能够生产大尺寸制品。其缺点是：（一）在实际生产中，由于晶相和玻璃相结构的不同，在经过高温处理后的冷却过程中，不可避免

的会在微晶玻璃制品中产生应力,这种应力的存在,将会给产品带来一定的缺陷。

(二) 由于烧结法是疏松颗粒烧结,堆积密度小,且这种材料是热的不良导体,造成表面和内部温差大,往往造成表面先封闭,内部气孔难以排除,烧结变形大,表面呈致密化深度浅,这严重影响其外观质量和成品率。模具从室温加热到较高的总温度会有或多或少的变形,这些都严重影响该行业的发展。(三) 烧结法制备的微晶玻璃材料存在一定的气孔,对其性能带来很不利的影响,也大大降低了产品的成品率

三、溶胶—凝胶法:溶胶—凝胶技术是低温合成材料的一种新工艺,其原理是将金属有机或无机化合物作为先驱体,经过水解形成凝胶,再在较低温度下烧结,得到微晶玻璃。与熔融法和烧结法不同,溶胶-凝胶法在材料制备的初期就进行控制,材料的均匀性可以达到纳米甚至分子级水平。

该方法吸引人之处:(一)其制备温度远低于传统方法,同时可以避免某些组分挥发、侵蚀容器、减少污染;(二)其组成完全可以按照原始配方和化学计量准确获得;(三)在分子水平上接获得均匀的材料;(四)可扩展组成范围,制备传统方法不能制备的材料。溶胶-凝胶法的缺点是生产周期长,成本高,环境污染人。另外,凝胶在烧结过程中有较大的收缩,制品容易变形。

目前用溶胶-凝胶法制备的含氧化锆的微晶玻璃体系有: $\text{Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, $\text{Na}_2\text{O—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$, $\text{Li}_2\text{O—Al}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2\text{—SiO}_2$ 等。

1.1.3 微晶玻璃的主要应用系统

微晶玻璃一问世,就以其系统广泛,品种繁多而著称。目前已经成功开发的实用系统包括以下几种类型:

一、由 $\text{Li}_2\text{O—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 系统微晶玻璃

该系统的突出特点是所获得的微晶玻璃材料可以具有非常低的膨胀系数(甚至为零或负膨胀),这主要是其主晶相 β —锂霞石($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)和 β —锂辉石($\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2$)的作用。该系统常用的晶核剂是 TiO_2 或 P_2O_5 。

二、由 $\text{Li}_2\text{O—MgO—SiO}_2$ 系统微晶玻璃

与 $\text{Li}_2\text{O—Al}_2\text{O}_3\text{—SiO}_2$ 系统微晶玻璃相反,该系统材料的最主要特点就是可以制得非常高的热膨胀系数(达 $140 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$)。该系统微晶玻璃主要组成(wt %)

Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to etd@xmu.edu.cn for delivery details.

厦门大学博硕士论文摘要库